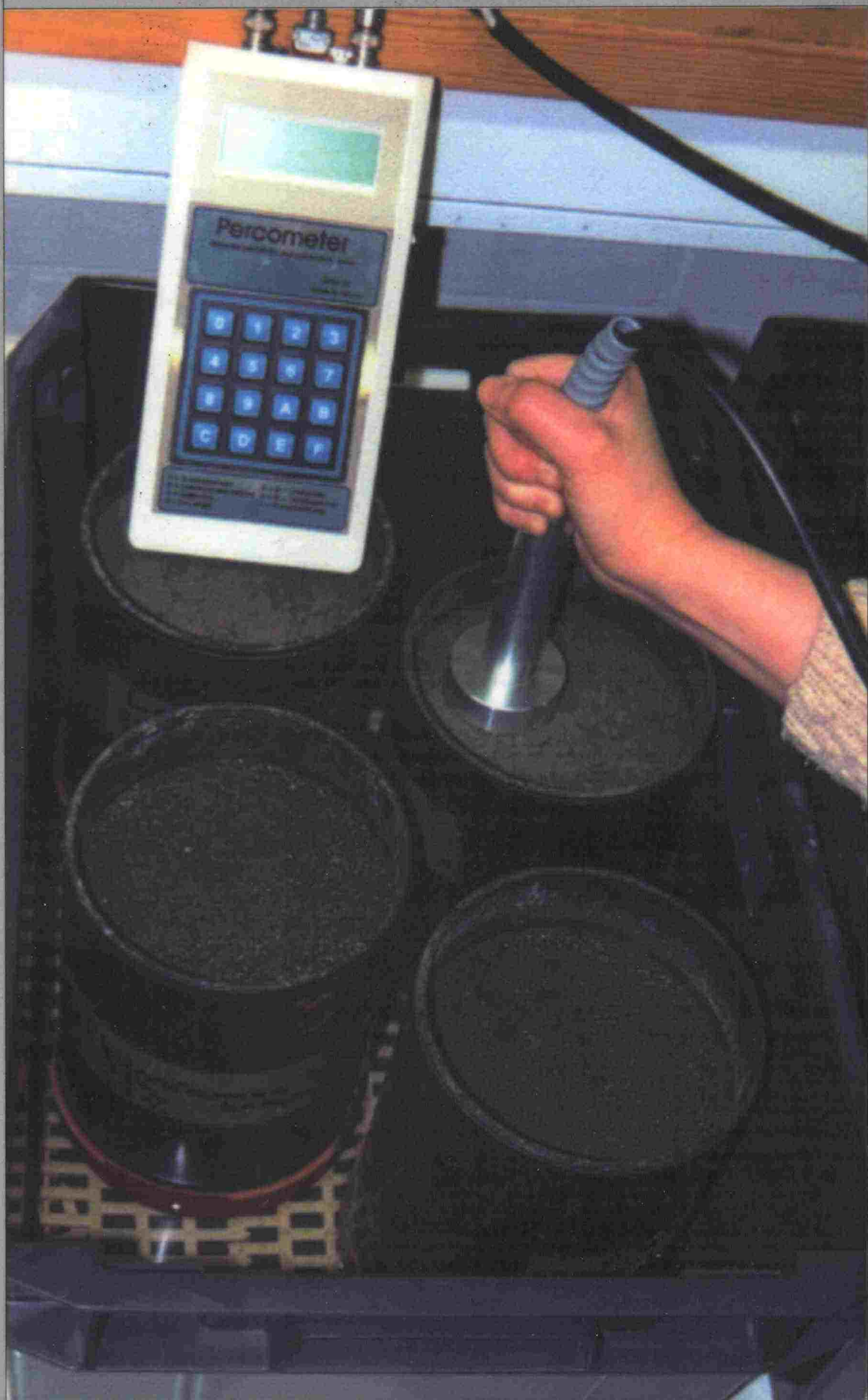




Tielaitos

Timo Saarenketo

TUBE SUCTION TEST - SITOMATTOMILLA MURSKEILLA SUORITETTUIJEN RENGASTESTIEN TULOKSET



**Tielaitoksen
selvityksiä**

20/2000

Rovaniemi 2000

**Tiehallinto
Lapin tiepiiri**

Timo Saarenketo

**TUBE SUCTION TEST - SITOMATTOMILLA
MURSKEILLA SUORITETTUIJEN
RENGASTESTIEN TULOKSET**

Tiehallinto
Lapin tiepiiri

Rovaniemi 2000

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-636-7
TIEL 3200608
Aakkoset Oy
Oulu 2001

Julkaisun kustannus ja myynti:
Tielaitos, hallintopalvelut, painotuotemyynti

Email: elsa.junttila@tielaitos.fi
Telefax 0204 22 2652

TIELAITOS
Lapin tiepiiri
PL 194
96101 ROVANIEMI
Puh. vaihde 0204 22 159

SAARENKETO, Timo: TUBE SUCTION TEST - SITOMATTOMILLA MURSKEILLA

SUORITETTUIJEN RENGASTESTIEN TULOKSET

Rovaniemi 2000. Tielaitos, Lapin tiepiiri,

Tielaitoksen selvityksiä 20/2000, 33 s + liitt.

ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-636-7, TIEL 3200608

Aiheluokka 56

Asiasanat Tube Suction test

Avainsanat Tube Suction test, dielektrisyys, sähkönjohtokyky, kantavan kerroksen murske, vesipitoisuus

TIIVISTELMÄ

Tube Suction test (TST) on kehitetty kantavan kerroksen murskeiden vedenherkkyyden tutkimiseksi, mutta sitä on käytetty onnistuneesti myös sidottujen murskeiden tutkimuksissa. Testissä näyte tiivistetään muoviputkeen, kuivataan ja asetetaan astiaan, jonka pohjalla on noin 10 mm vettä. Tämän jälkeen näytteen läpi imeytyvän vapaan veden määrää mitataan dielektrisyiden avulla. Testin avulla näytteet voidaan jakaa laadultaan kolmeen luokkaan, hyvälaatuisiin, marginaalisiin ja huonoihin.

Tässä tutkimuksessa, joka tehtiin yhteistyönä tielaitoksen Lapin tiepiirin, Texas Transportation Institutun ja Office of Minnesota Road Researchin kanssa vertailtiin näiden organisaatioiden laboratorioissa tehtäviä Tube Suction testien tuloksia keskenään. Kussakin laboratoriossa tutkittiin hyvä- ja huonolaatuinen kantavan kerroksen murske, jotka oli valittu Suomesta, Teksasista ja Minnesotasta Yhdysvalloista sekä Saskatchewanista Kanadasta.

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että vaikkakin mittaustuloksissa oli pieniä, lähinnä näytteen valmistustekniikasta johtuvia eroja, osoittautuivat kaikissa kenttäkäyttämistään hyvälaatuiset näytteet hyviksi ja ongelmalliset huonoiksi. Tässä raportissa kuvataan nykyiset Tube Suction testissä käytetyt näytteenvalmistus- ja mittausmenetelmät sekä esitetään parannusehdotuksia, siten että jatkossa mittaustulokset ovat vieläkin yhdenmukaisemmat.

ESIPUHE

Vuosina 1994-95 Timo Saarenketo ja Tom Scullion kehittivät Texas Transportation Insitutessa (TTI) imupainetestin (Tube Suction Test, TST) tierakenteen kantavan kerroksen murskeiden vedenherkkyyden tutkimiseksi. Se on osoittautunut erinomaiseksi työkaluksi ongelmallisten ja hyvälaatuisten kantavan kerroksen murskeiden tunnistuksessa.

Tähän mennessä TS-testiä on käytetty Lapin tiepiirissä, TTI:ssä ja Minnesotan Tietutkimuslaitoksella (Minnesota Road Research, Mn/ROAD) useiden sidottujen ja sitomattomien tienrakennusmateriaalien tutkimiseen. Testin tulosten perusteella kantavan kerroksen murskeita on jaoteltu kolmeen laatuluokkaan: hyvälaatuisiin, kyseenalaisiin sekä sopimattomiin. Jatkossakin TS-testiä voidaan käyttää murskeiden luokitteluun sekä niiden hyväksymiskriteerinä. Tätä käyttöä varten on tehtävä vertailevia tutkimuksia testausmenetelmän standardisoinniseksi.

Ensi vaiheessa Lapin Tiepiirin ja TTI:n laboratoriot sopivat rengastutkimus-hankkeesta, jossa samoista murskeista otettuja näytteitä testattiin TS-testillä eri laboratorioissa niiden omia näytteen valmistus- ja mittausmenetelmiä käyttäen. Saskatchewanin yliopisto liittyi hankkeeseen myöhemmin ja lähetti omat näytteensä laboratorioille; Saskatchewanissa ei kuitenkaan suoritettu testejä muiden laboratorioden lähettämille murskenäytteille. Tutkimusta koordinoi Timo Saarenketo (Tielaitos, myöh. Roadscanners Oy), Tom Scullion (TTI), ja Dave van Deusen (Mn/ROAD). Seppo Ylitalo (Tielaitos), Spencer Guthrie (TTI) ja Dave Baker (Mn/ROAD) vastasivat laboratoriotestien suorittamisesta.

SISÄLLYS

1. TUTKIMUKSEN TAUSTAA	9
2. TUBE SUCTION -TESTIN SUORITTAMINEN	11
3. TUTKIMUKSEN TULOKSET	17
3.1. Näytteiden valmistaminen testilaboratorioissa; tiivistys ja kuivairtoteiheydet	17
3.2. Dielektrisyysprofiilit	19
3.3. Dielektrisyysarvon asymptoottien vertailu	25
3.4. Näytteiden vesipitoisuus	26
4. JOHTOPÄÄTÖKSET	29
5. SUOSITUKSIA	32

LÄHDELUETTELO**LIITE 1. YLITAPIO****LIITE 2. GUTHRIE**

1. TUTKIMUKSEN TAUSTAA

Maatutkateknologian (GPR, ground penetrating radar) yleistyminen tietutkimuksissa 1980-luvun lopulla ja 1990-luvun alussa johti tarpeeseen ymmärtää paremmin maatutkasignaalin käyttäytymistä tien eri rakennekerroksissa. Maatutkasignaalin etenemisnopeus väliaineessa määräytyy väliaineen dielektristen ominaisuuksien perusteella. Dielektristen ominaisuuksien on puolestaan todettu heijastavan vapaan veden määrää maa-aineksessa ja murskeessa.

Vuosina 1994-95 Texas Transportation Institute (TTI) toteutti tutkimushankkeen, jonka tehtävänä oli selvittää sitomattomien kantavan kerroksen murskeiden sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien välistä suhdetta. Tämä tutkimus, jonka rahoittivat Teksasin tielaitos (Texas Department of Transportation) ja osaltaan Lapin tiepiiri, keskittyi hyvin toimivien sekä ongelmallisten kantavan kerroksen murskeiden sähköisten ja mekaanisten ominaisuuksien tutkimiseen (Saarenketo ja Scullion 1996, Scullion ja Saarenketo 1997). Tutkimusprojektin yhteydessä Timo Saarenketo ja Tom Scullion kehittivät imupainetestin erityisesti sitomattomille murskeille. Tässä ns. Tube Suction -testissä mitataan kapasitanssiin perustuvien dielektrisyysmittausten avulla kapillaarista imupainetta murskenäytteessä, jonka alaosa on kosketuksissa veteen. Vapaan veden määrän todettiin tutkimuksissa selittävän murskeen mekaanisia ominaisuuksia paremmin kuin perinteinen gravimetrinen vesipitoisuus. (Saarenketo 1995, Saarenketo et al 1998)

Tube Suction -testi osoittautui välittömästi erinomaiseksi työkaluksi ongelmallisten kantavan kerroksen murskeiden erottamiseksi hyvin toimivista murskeista. Vuosina 1994-95 TTI:n laboratorioissa suoritettiin TS-testejä myös kemiallisesti stabiloidusta kantavasta kerroksesta otetuille näytteille. Testit osoittivat, että kaikissa ongelmallisten kantavan kerroksen materiaalien näytteissä vesi nousi imupaineen johdosta materiaalissa ylöspäin, mikä näkyi näytteen yläpinnalta mitatun dielektrisyysarvon kasvamisena. Käytännössä hyvälaatuisiksi todettujen kantavan kerroksen materiaalien näytteissä vastaavaa kosteuden nousua tapahtui vain vähäisessä määrin. Lisäksi todettiin, että kosteuden imeytyminen stabiloituun materiaaliin johti materiaalissa sekundäärisiin reaktioihin ja sideaineen liukenemiseen, minkä lopputuloksena on päällysrakennekerroksen lujuusominaisuuksien nopea heikkeneminen ja edelleen päällysteen vaurioituminen.

Murskeiden testausmenetelmän kehittämistä on jatkettu 1996-97 sekä 1999 TTI:n ja Lapin tiepiirin laboratorioissa. Suomessa Tielaitoksen laboratorioissa on tutkittu mm. hienoainespitoisuuden (< 0.063 mm) vaikutusta TS-testin tuloksiin (Ylitapio 1997). Tulokset osoittivat, että hienoainespitoisuuden kasvaessa myös näytteistä mitattu dielektrisyysarvo kasvoi. Oulun yliopistossa samoilla näytteillä suoritettu kemiallinen analyysi (Yliheikkilä 1998) paljasti lisäksi korrelaation materiaalien kemiallisten ominaisuuksien ja kosteustasapainon välillä. Nämä kaksi tutkimusta osoittivat TS -testin mittaavan materiaalin kokonaispotentiaalia (kokonaisimupainetta). Kokonaisimupaineen osatekijöitä ovat matriisi-imupaine (matric suction), johon vaikuttaa tiivistetyssä materiaalissa olevan hienoaineksen määrä ja osmoottinen potentiaali, jonka määrään vaikuttavat materiaalin kemialliset ominaisuudet.

Vuonna 1997 Tampereen teknillinen korkeakoulu aloitti uuden tutkimushankkeen kantavan kerroksen murskeiden muodonmuutosominaisuuksien tutkimiseksi simuloiden olosuhteita, jolloin materiaali on kuiva ja sen jälkeen kun ne ovat voineet imeä vettä. Kokeet suoritettiin TTKK:n Geotekniikan laboratorion koetiloissa dynaamisella kolmiakselialikoelaitteistolla (Saarenketo, Scullion ja Kolisoja, 1998). Tulokset osoittavat että veden kanssa tekemisissä olleen kantavan kerroksen materiaalin resilient moduulit olivat yli 25% alhaisempia kuin kuivasta materiaalista mitatut moduulit.

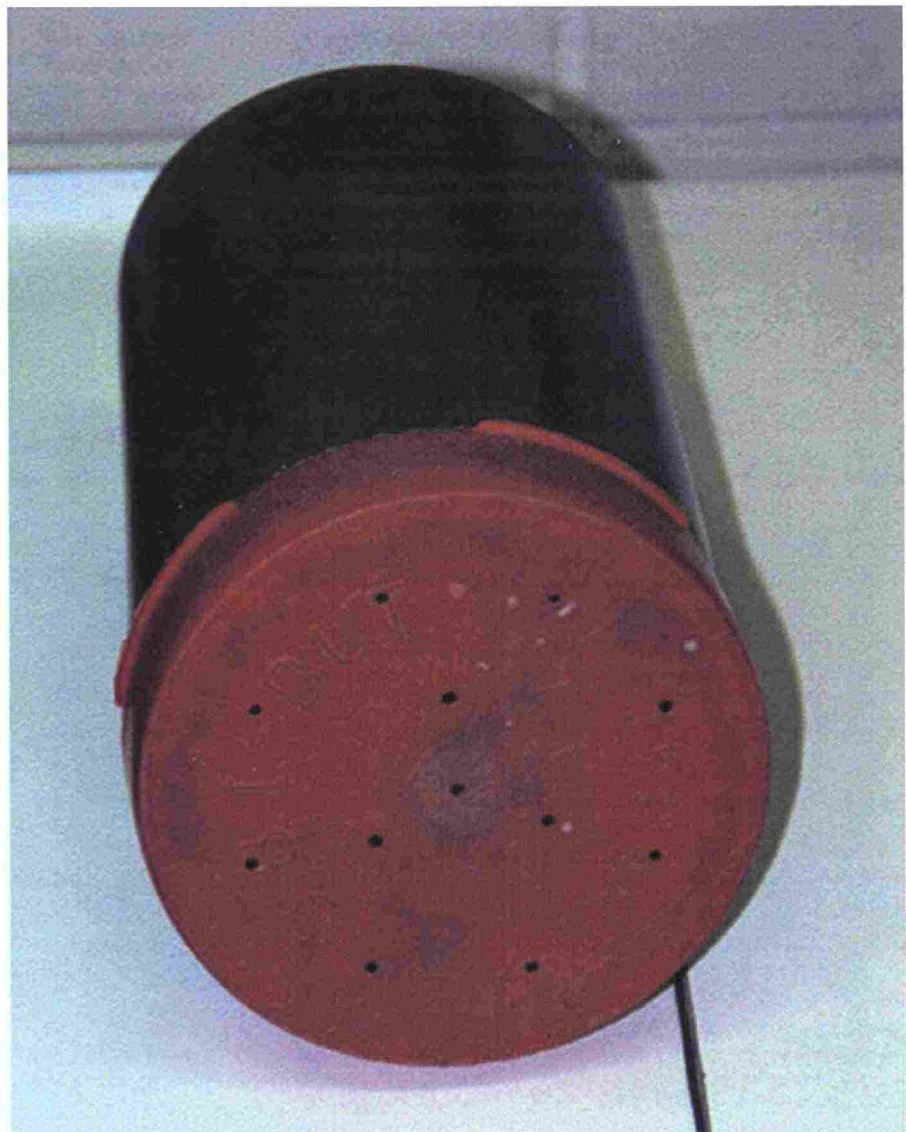
Tekساسissa TTI:ssä 1996-97 TS-testillä analysoitiin ja luokiteltiin menestyksellisesti useita materiaaleja toisaalta hyvälaatuisiin ja toisaalta ongelmallisiin kantavan kerroksen murskeisiin. Samoin TS-testin avulla tutkittiin eri lisäaineiden vaikutusta materiaalien ominaisuuksiin.

Tämän rengastutkimuksen tavoitteena oli verrata eri laboratorioissa samoilla näytteillä tehtyjen TS-testien tuloksia, jotta jatkossa TS-testin näytteiden valmistus-, mittaus- ja muut tutkimusmenetelmät saataisiin yhdenmukaistettua kaikissa testiä käyttävissä laboratorioissa.

2. TUBE SUCTION -TESTIN SUORITTAMINEN

Rengastestin Tube Suction -testeissä käytettiin seuraavaa testin suoritusohjetta:

1. Noin 8000-9000 g optimivesipitoisuudessa olevaa murskettä (<18 mm, TTI:ssä <25 mm) tiivistetään muoviputkeen, joka on halkaisijaltaan 150 mm ja korkeudeltaan 180 -200 mm. Putken pohjan peittävään kanteen on porattu pieniä noin 2 mm reikiä kuvan 1. esittämällä tavalla. Reiät voidaan porata myös putken sivuille noin 10 mm putken alalaidasta (ks. kuva 4). Tiivistys suoritetaan kussakin maassa käytetyllä näytteentiivistysmenetelmällä (kuvat 2 ja 3). Jos näytteen pinta on tiivistyksen jälkeen epätasainen, se tasoitetaan käyttäen < 2 mm murskettä.



Kuva 1. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa käytetty TST-näyteputki. Muovikannta käytettäessä voidaan näyte tiivistää kiertotiivistimellä. Kannen reikien halkaisija on 2 mm.



Kuva 2. Suomessa TST-näytteiden tiivistämiseen käytetty ICT -kiertotiivistin.

Bitumilla, sementillä, tai muilla sideaineella sidotulla näytteillä näytteen korkeus on 100 mm. Näytettä kuivataan + 40°C lämpötilassa kunnes sen painossa ei enää tapahdu merkittävää muutosta. Normaalisti tämä vie 3-4 päivää.



Kuva 3. TST-näyteputkelle tehty ICT -kiertotiivistimen muotti.

2. Näytteen pinnasta mitataan dielektrisyysarvo ja sähkönjohtavuus ja näyte asetetaan muoviasiaan, jonka pohjalla on noin 10 mm tislattua tai deionisoitua vettä (kuva 4). Putken päälle voidaan asettaa kuminen levy suojaamaan näytteen pintaa vesiroiskeilta.

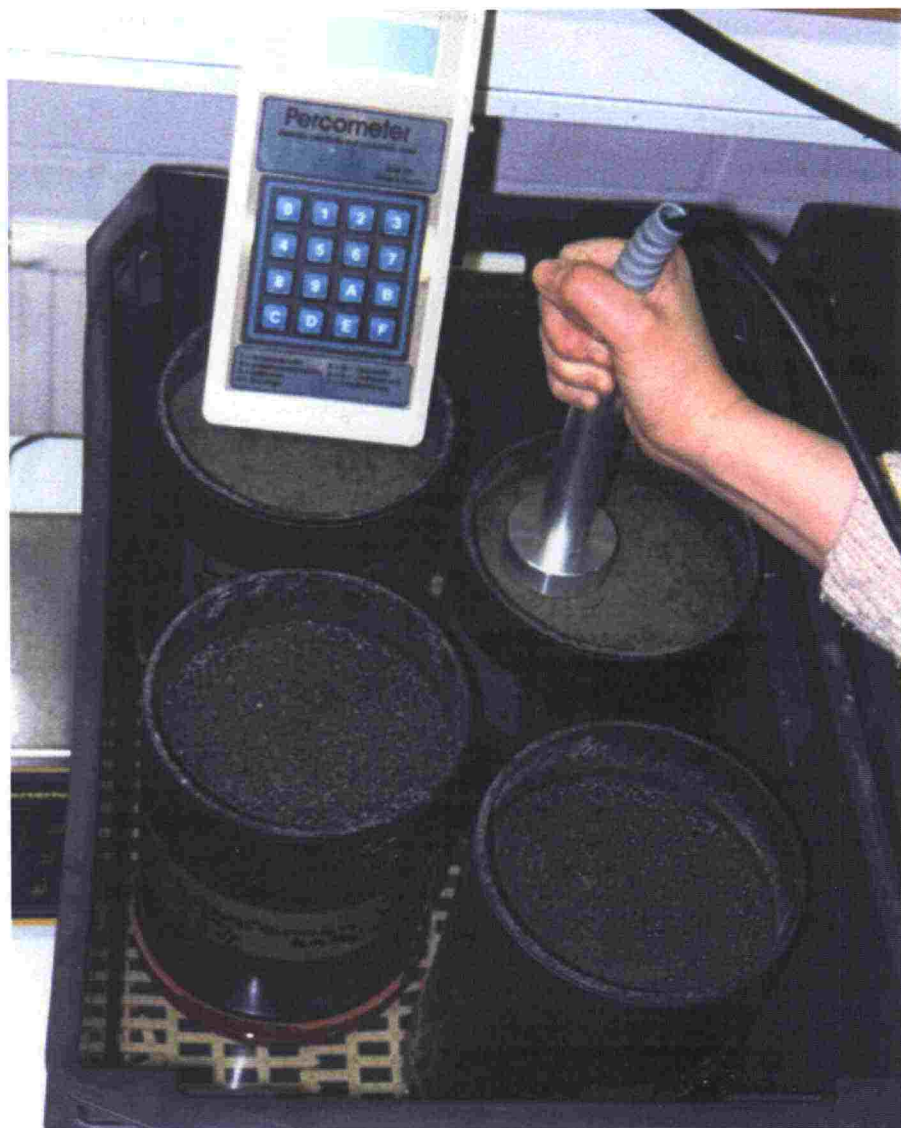


*Kuva 4. TST-putkia vesiammeessa TTI :n tutkimuksissa. Teksasissa suoritettuis-
sa tutkimuksissa reiät porattiin putkien kylkiin noin 10 mm alareunasta.*

Bitumilla sidottujen näytteiden annetaan kuivauksen jälkeen tasaantua kaksi päivää huonelämpötilassa ennen testin aloittamista. Kemiallisesti sidottujen näytteiden täytyy antaa tasaantua vähintään seitsemän päivää avoimessa tilassa ennen testiä.

3. Dielektrisyysarvo ja sähkönjohtavuus mitataan näytteen pinnalta (kuva 5) määrätyin väliajoin ja näyte punnitaan kosteuspitoisuuden määrittämiseksi. TS-testin vaatima kokonaisaika on 10-14 päivää.

Dielektrisyysmittaukset tehdään kapasitanssiin perustuvalla mittarilla. Virolaisen Adek Ltd:n valmistaman mittauslaitteen pintasensorin halkaisija on 50 mm ja käytetty mittaustaajuus dielektrisyysmittauksissa on 50 MHz. Noin 4-6 mittausta otetaan näytteen pinnasta eri kohdilta, ja Percometer laskee näistä keskiarvon jättäen pois suurimman ja pienimmän mitatun arvon.



Kuva 5. Dielektrisyysarvon ja sähkönjohtavuuden mittaaminen Percometer-pintasensorilla Tielaitoksen laboratoriossa. Näyteputket on asetettu vesiammeeseen muovimaton päälle, jotta vesi pääsee vapaasti imeytymään sisään putken pohjalla olevien reikien kautta.

4. Lopuksi näytteet otetaan pois muoviputkesta, kuivataan $+105^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa ja punnitaan gravimetrisen kosteuspitoisuuden laskemiseksi. Kun näytteen korkeus tiedetään, on mahdollista laskea myös näytteen tilavuus ja kuivairtitiheys.

5. Dielektrisyys arvon mittaustuloksia tarkastellaan graafisena esityksenä ajan funktiona; materiaalin laatuluokituksen perusteena käytetään testin loppuosassa mitattujen dielektrisyysarvojen asymptoottia. Sähkönjohtavuusmittaukset kertovat, johtuuko havaittu vedenherkkyys korkeasta hienoainepitoisuudesta (matriisipotentiaalista) vai materiaalin kemiallisista ominaisuuksista (osmoottisesta potentiaalista). Dielektrisyysarvon nousun nopeus testin kuluessa ilmaisee myös, onko materiaali hydrofobinen eli vettä hylkivää vai hydrofiilinen eli vettä suosiva sekä minkälainen on materiaalin vedenläpäisykyky.

6. Koetuloksien perusteella sitomattomat murskeet laatuluokitellaan seuraavasti:

TS-testin arvo	Luokitus
<10	Hyvälaatuinen kantavan kerroksen murske
10-16	Kyseenalainen kantavan kerroksen murskeeksi
> 16	Sopimaton kantavan kerroksen murskeeksi

Suomessa TS-testin arvoa 9 on myös käytetty hyvälaatuiseksi luokiteltavan murskeen alarajana.

3. TUTKIMUKSEN TULOKSET

3.1. NÄYTTEIDEN VALMISTAMINEN TESTILABORATORIOISSA, TIIVISTYS JA NÄYTTEIDEN KUIVAIRTOTIHEYDET

Vaikka TS-testit suoritettiin olennaisilta osiltaan samalla tavalla kaikissa projektilaboratorioissa, näytteiden valmistamisessa ja erityisesti näytteen tiivistämismenetelmissä oli laboratorioiden välillä suuria eroja.

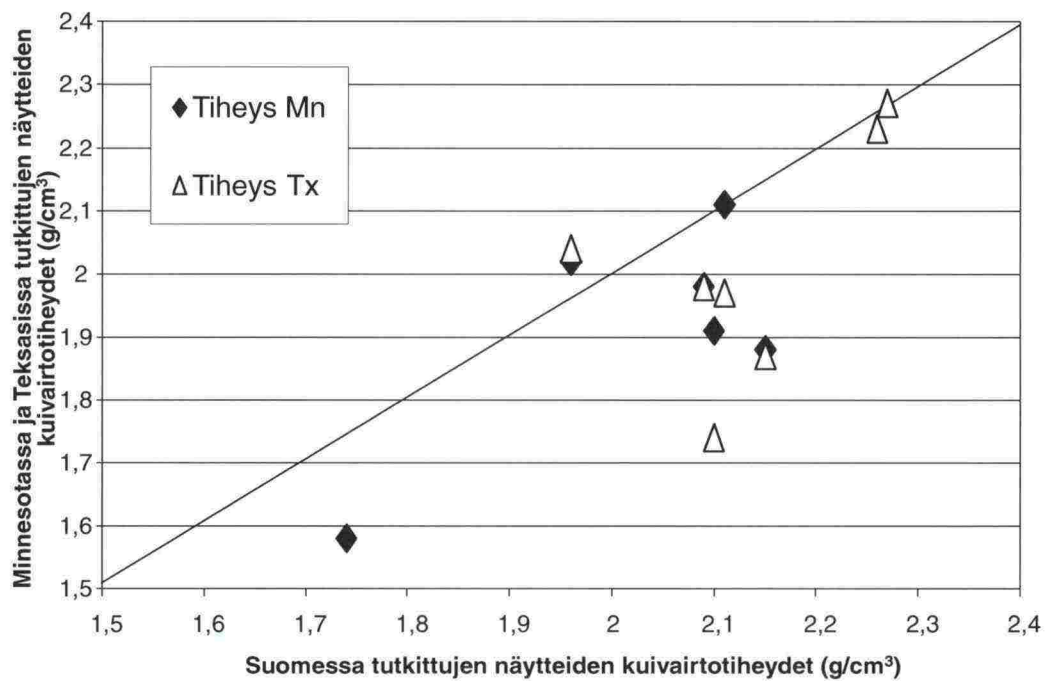
Suomessa käytetty näytteenvalmistusmenetelmä sekä TS-testin suoritus on kuvattu liitteessä 1. Liite 2 esittelee Teksasin näytteen valmistelutoimenpiteet sekä keskeiset rengastestin tulokset TTI:n laboratoriossa.

Minnesotassa näytteet, jotka olivat tulleet Teksasista, Suomesta ja Saskatchewanista tiivistettiin käyttäen 4,54 kg pudotusvasaraa, mutta Mn/ROAD:in omat näytteet tiivistettiin kiertotiivistimellä. Kaikkien näytteiden kuivatusaika oli ensin 6 päivää 60 °C lämpötilassa ja myöhemmin 10 päivää 40°C lämpötilassa. TS-testin aikana näytteet olivat avoimia; myöhemmin Minnesota on myös alkanut peittää TST-näyteputket kannella. Ensimmäisellä testikierroksella Minnesotassa dielektrisyysmittaukset tehtiin käyttäen Percometerin "pehmeän materiaalin" asetusta, mikä selittää hieman muita projektilaboratorioita alemmat mitatut dielektrisyysarvot.

Kunkin projektilaboratorion TST-näytteiden kuivairtitiheydet on esitetty taulukossa 1. Eri materiaalien näytteistä Suomessa ja toisaalta Teksasin ja Minnesotan laboratorioissa mitattuja kuiva-aineen tiheyksiä on vertailtu kuvassa 6. Tuloksista näkyy, että kiertotiivistimen käyttö (Suomessa) on johtanut suurempiin näytteiden kuivairtitiheyksiin varsinkin tasolla 2.1 g/cm³.

Taulukko 1. TST-näytteiden kuivairtitiheydet.

Näyte	Kuivairtitiheys (g/cm ³)		
	Suomi	Minnesota	Teksas
Teksas, ongelmallinen	1,74	1,58	
Teksas, hyvälaatuinen	2,11	2,11	1,97
Minnesota, Class 3 (ongelm.)	2,15	1,88	1,87
Minnesota, Class 6 (hyväl.)	2,10	1,91	1,74
Suomi, hyvälaatuinen (Tohmov.)	2,09	1,98	1,98
Suomi, ongelm. (Lampeltn.)	1,96	2,02	2,04
Saskatchewan, hyvälaatuinen	2,27		2,27
Saskatchewan, ongelmallinen	2,26		2,23



Kuva 6. Teksasissa ja Minnesotassa sekä Suomessa valmistettujen näytteiden kuivairtitiheyksien korrelaatio.

3.2. DIELEKTRISYYSPROFIILIT

Seuraavassa on kuvattu tutkittujen murskeiden dielektrisyysarvon muutokset testin aikana:

Teksas, huonolaatuinen murske

TST-tulokset Teksasin huonolaatuisen murskeen näytteille on esitetty kuvassa 7. Näytteestä mitatut lopulliset dielektrisyysarvot erosivat suuresti laboratorioden välillä. Suomessa dielektrisyysarvo nousi hyvin nopeasti tasolle 36-39, kun taas Minnesotassa ja Teksasissa dielektrisyysarvot nousivat hitaammin ja päätyivät tasolle 25-27. Kaikki tulokset osoittivat kuitenkin näytteen olevan selvästi heikkolaatuinen. Minnesotassa näyte on ennen testiä onnistuttu kuivaamaan erittäin hyvin, kun taas Teksasin näytteissä dielektrisyysarvon alkuarvo on lähellä kymmentä.

Teksas, hyvälaatuinen murske

Kuva 8 esittää Teksasin hyvälaatuisen murskeen TST-tulokset. Tämän materiaalin näytteiden testitulokset erosivat kaikkein eniten laboratorioden välillä. Teksasin laboratorion saamat TST-tulokset olivat jopa huonommat kuin laboratorion huonolaatuiselle Teksasin murskeelle saamat tulokset. Ero luultavasti johtuu siitä, että Teksasissa tutkitut näytteet tulivat eri varastoerästä kuin Suomessa ja Minnesotassa tutkitut näytteet. Sekä Suomessa että Minnesotassa saadut tulokset kertoivat materiaalin olevan laadultaan arvioitua heikompaa; molempien laboratorioden TST-arvo oli yli 15.

Minnesota, huonolaatuinen murske

TST-tulokset Minnesotan huonolaatuisen murskeen näytteille on esitetty kuvassa 9. Tämän materiaalin näytteiden TST-tulokset eri laboratorioista olivat suhteellisen yhtäpitävät. Vain Minnesotassa dielektrisyysarvo jäi juuri alle arvon 16.

Minnesota, hyvälaatuinen murske

TST-tulokset Minnesotan hyvälaatuisen murskeen näytteille on esitetty kuvassa 10.

Tästä näytteestä Suomessa mitatut arvot ovat selvästi korkeammat verrattuna Minnesotan tai Teksasin testeissä mitattuihin arvoihin. Korkeammat dielektrisyysarvot voivat selittyä Suomessa valmistettujen näytteiden selvästi korkeammalla kuivairtohiheydellä (2.10 g/cm^3), kun vastaavat arvot olivat Minnesotassa (1.91 g/cm^3) ja Teksasissa (1.74 g/cm^3). Kaikissa laboratorioissa TS-testi kertoi kuitenkin selvästi materiaalin olevan kantavan kerroksen murskeena hyvälaatuista.

Suomi, huonolaatuinen murske

TST-tulokset Suomen huonolaatuiselle murskeelle on esitetty kuvassa 11. Laboratorioden mittaustulokset ovat yhtenevät testin alkuvaiheessa, mutta ensimmäisen testipäivän jälkeen Minnesotan testin dielektrisyysarvo vakiintui tasolle 15, Suomen tasolle 20, kun taas Teksasin mittauksissa dielektrisyysarvo jatkoi nousuaan. Kaikkien laboratorioden TS-testit kuitenkin selvästi ilmaisivat kyseessä olevan huonolaatuisen murskeen.

Suomi, hyvälaatuinen murske

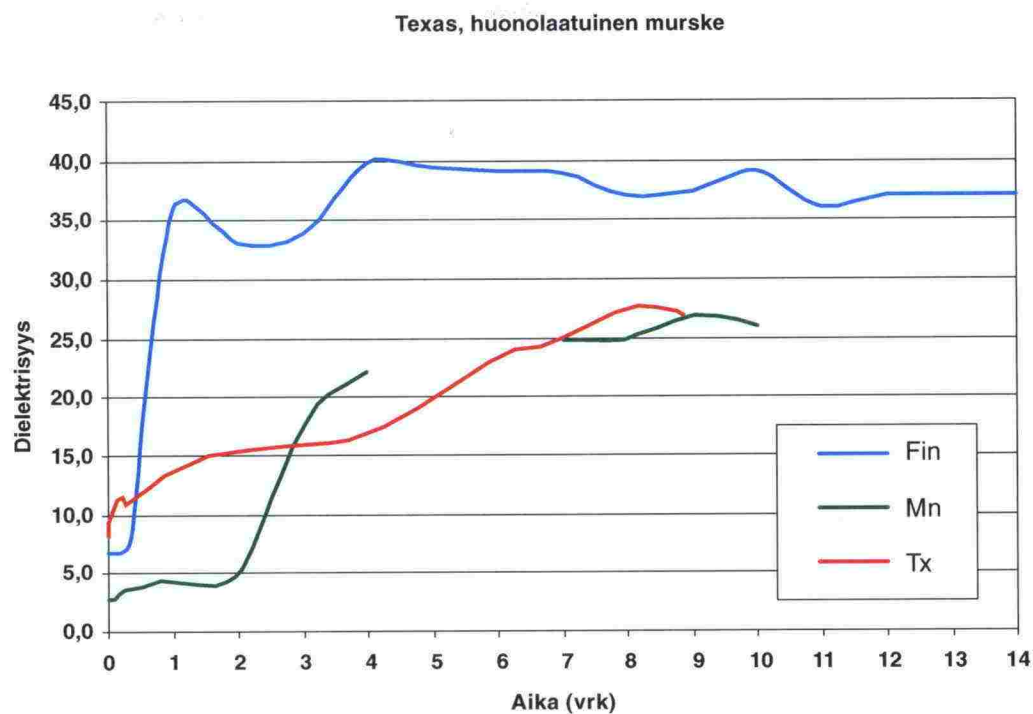
TohmoVaaran murske edustaa hyvän laatuista suomalaista kantavan kerroksen materiaalia. TST-tulokset on esitetty kuvassa 12. Testin ensimmäisten päivien mittaustulokset ovat Suomessa ja Teksasissa yhtenevät, mutta Minnesotan testissä dielektrisyysarvo nousee paljon hitaammin. Tästä testin loppuun saakka Suomen ja Minnesotan dielektrisyysarvoissa ei tapahtunut suurempia muutoksia, ja vakiintunut dielektrisyystaso jäi molemmilla selvästi alle hyvälaatuisen murskeen raja-arvon 10. Teksasin testin muita korkeampi lopputulokset johtuneet luultavasti näytteen pinnalla käytetystä liian suuresta määrästä hienoainesta, jolla pintaa tasoitettiin mittauksia varten.

Saskatchewan, huonolaatuinen murske

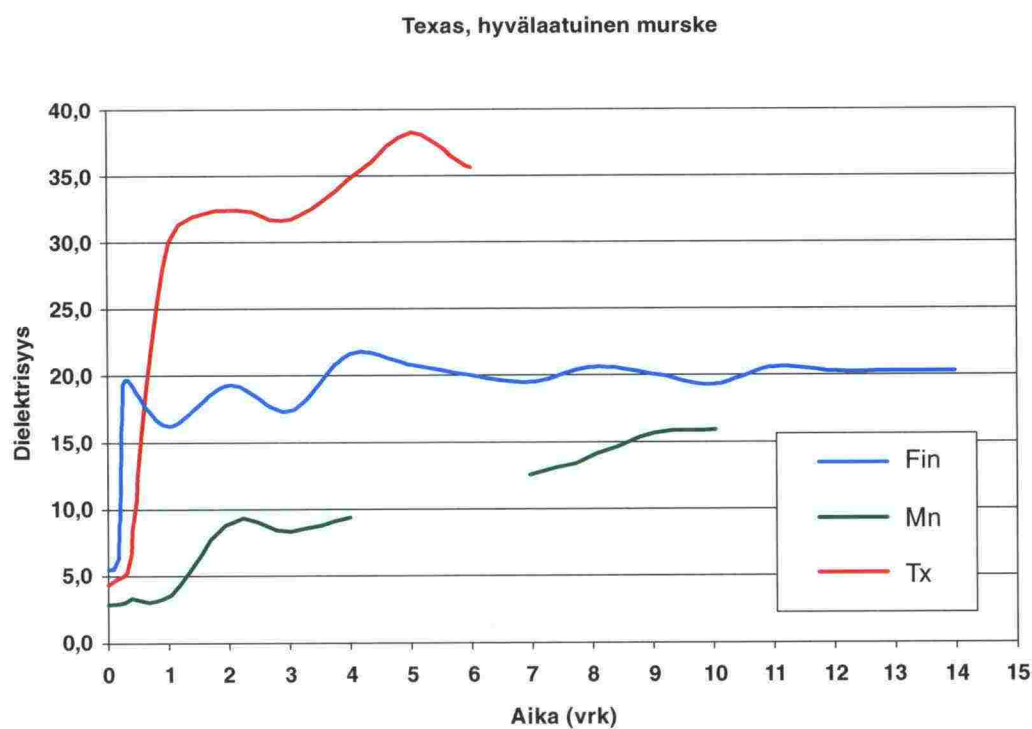
Kuva 13 esittää Saskatchewanin huonolaatuisen murskeen testitulokset. Dielektrisyysprofiilit osoittavat, kuinka Suomessa tehdyssä testissä dielektrisyysarvo nousi kolmessa päivässä yli 15, kun taas Teksasissa ja Minnesotassa vastaavat arvot pysyivät alkutasolla kaksi päivää ennen kuin alkoivat hitaasti nousta. Testitulosten perusteella Saskatchewanin huonolaatuinen murske luokiteltaisiin sekä Teksasissa että Minnesotassa soveltuvuudeltaan kyseenalaiseksi ja Suomessa huonolaatuiseksi kantavan kerroksen murskeeksi.

Saskatchewan, hyvälaatuinen murske

Saskatchewanin hyvälaatuisen murskeen testitulokset on esitetty kuvassa 14. Tulosten mukaan näytemateriaali käyttäytyi lähes identtisesti Minnesotan ja Teksasin testeissä. Suomessa dielektrisyysarvo nousi alussa muita korkeammalle, mutta palasi myöhemmin samalle tasolle Minnesotan ja Teksasin mittaustulosten kanssa. Huomattavaa on myös, että Teksasin laboratorion TST-tuloksissa sekä hyvä- että huonolaatuiset kantavan kerroksen murskeet saivat lähes samanlaisia arvoja (11.0 ja 10.1)

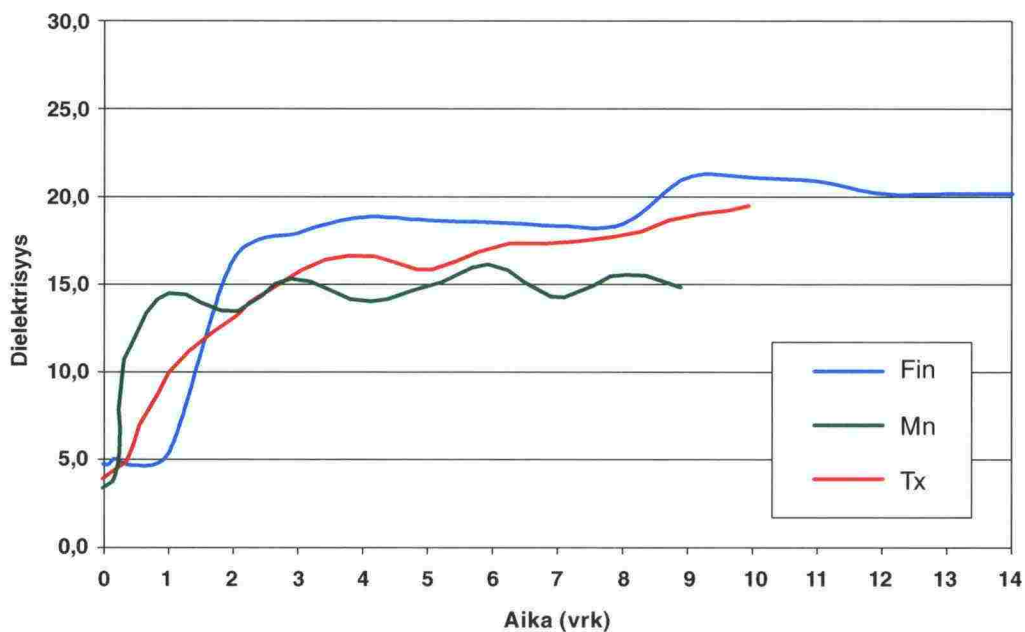


Kuva 7. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Teksasin huonolaatuinen kantavan kerroksen murske



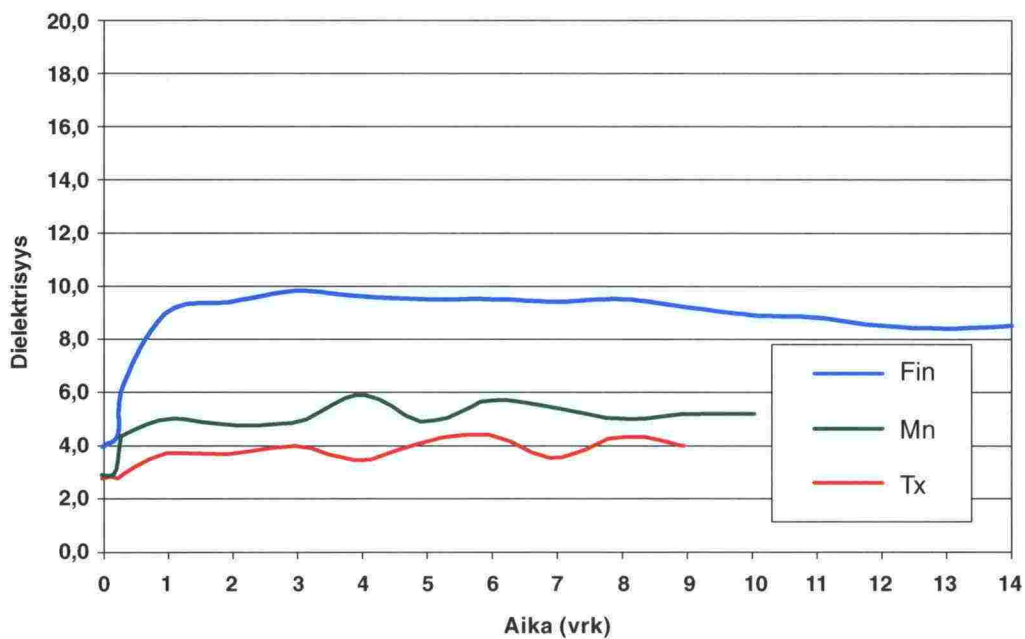
Kuva 8. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Teksasin hyvälaatuinen kantavan kerroksen murske

Minnesota, huonolaatuinen murske, CI 3



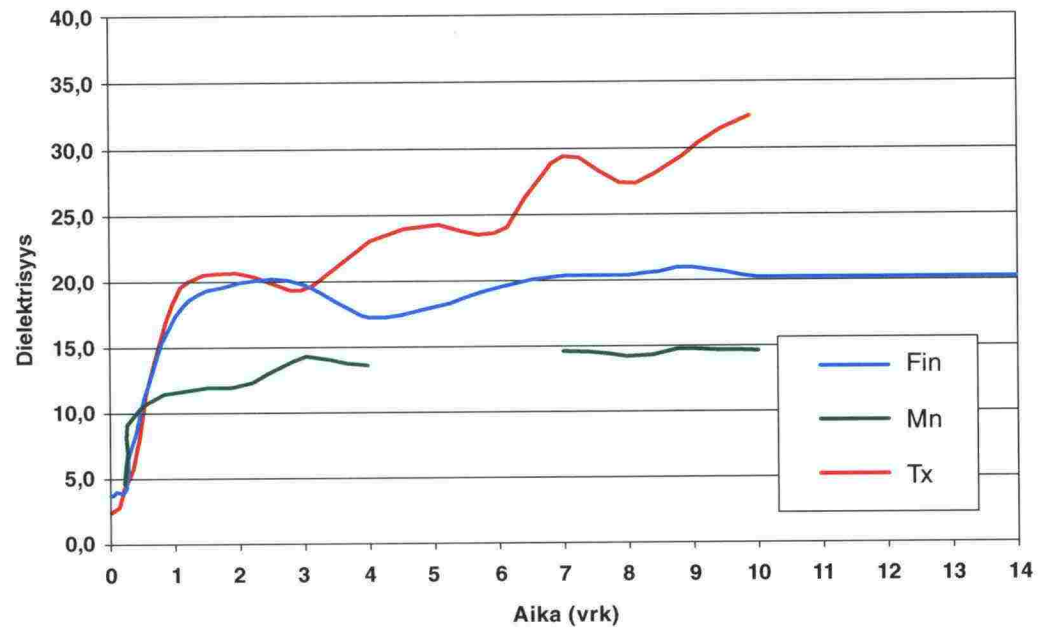
Kuva 9. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Minnesotan huonolaatuinen kantavan kerroksen murske

Minnesota, hyvälaatuinen murske, CI 6



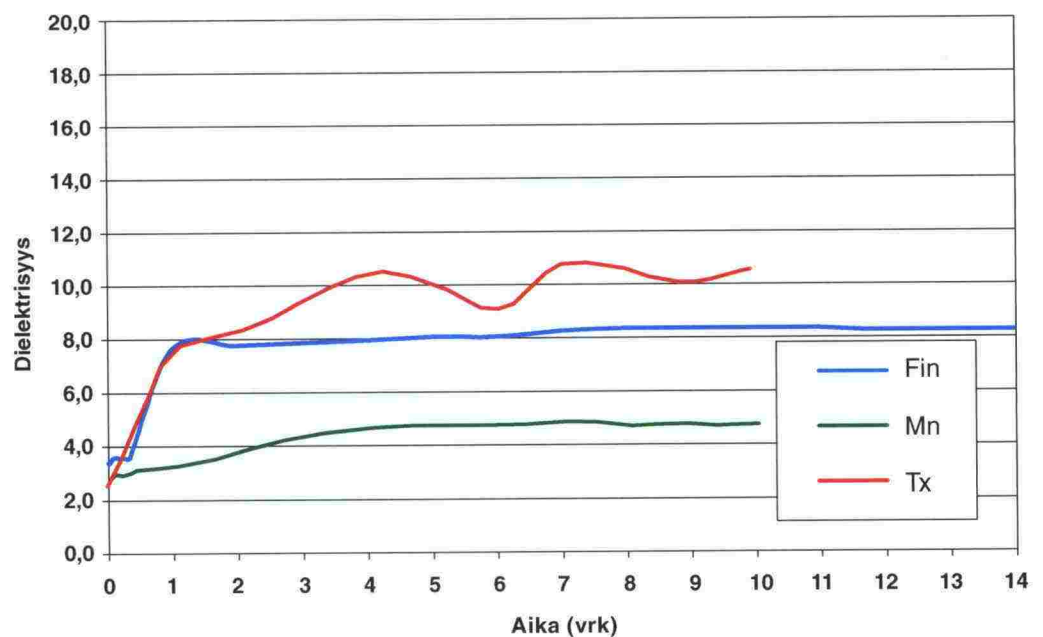
Kuva 10. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Minnesotan hyvälaatuinen kantavan kerroksen murske

Suomi, huonolaatuinen murske, Lambeltmossen



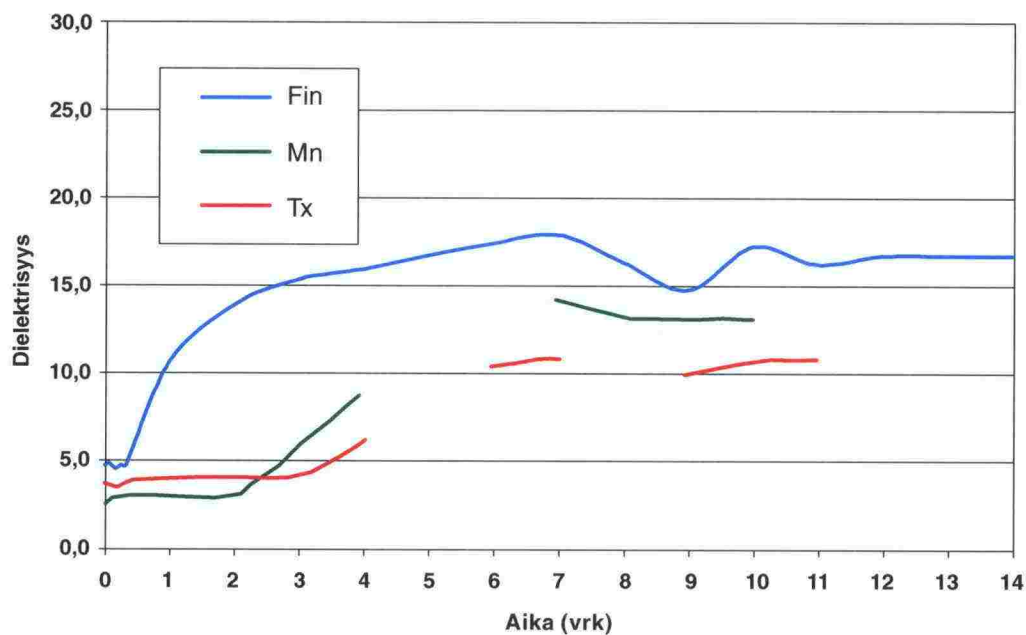
Kuva 11. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Suomen huonolaatuinen kantavan kerroksen murske

Suomi, hyvälaatuinen murske, Tohmovaara



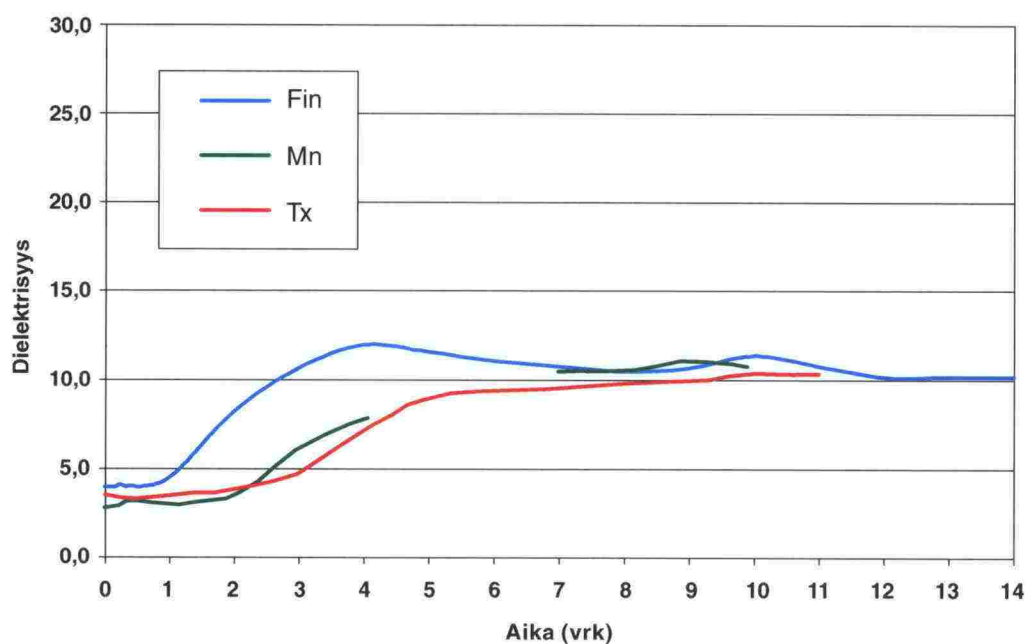
Kuva 12. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Suomen hyvälaatuinen kantavan kerroksen murske

Saskatchewan, huonolaatuinen murske



Kuva 13. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Saskatchewanin huonolaatuinen kantavan kerroksen murske

Saskatchewan, hyvälaatuinen murske



Kuva 14. TS-testin dielektrisyysprofiilit, Saskatchewanin hyvälaatuinen kantavan kerroksen murske

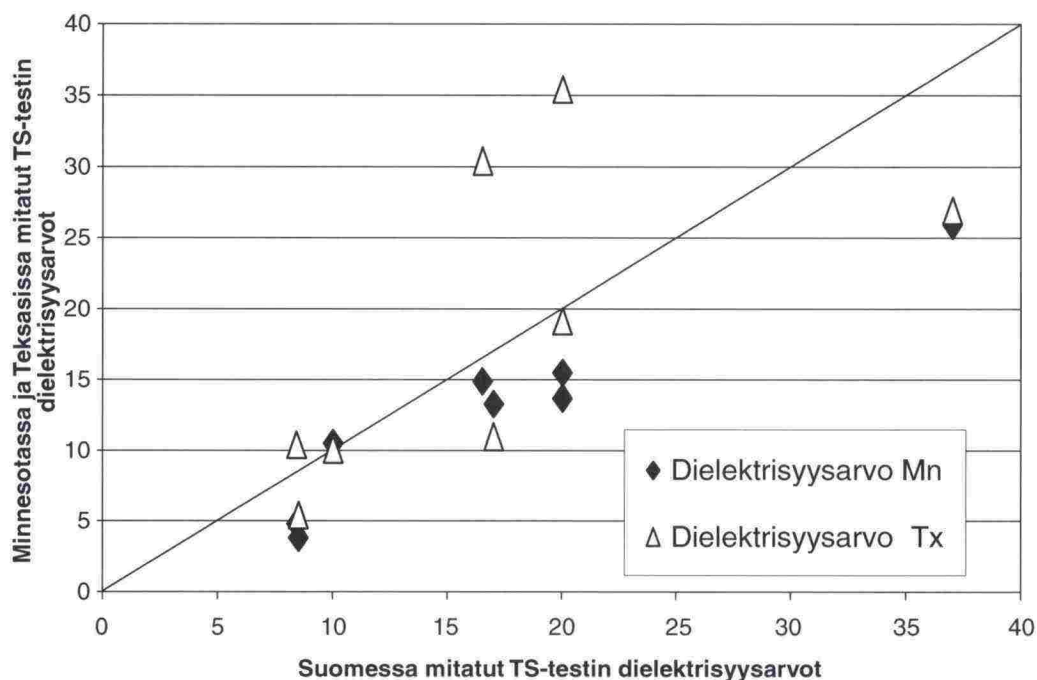
3.3. DIELEKTRISYYSARVON ASYMPTOOTTIEN VERTAILU

Taulukossa 2 esitetään dielektrisyysarvon asymptoottiarvot TS-testeissä. Kuva 15 vertailee Suomen TST-tuloksia Minnesotan ja Teksasin tuloksiin. Nämä tulokset osoittavat, että vaikka absoluuttiset mittausravot laboratorioden välillä eroavat, kunkin laboratorion testitulokset tunnistavat hyvälaatuiset murskeet. Ainoa poikkeus tästä on Teksasin laboratorion testitulokset Teksasin omilla näytteillä, mihin todennäköinen syy oli että Teksasissa testatut näytteet tulivat eri varastoerästä kuin muiden laboratorioden testaamat vastaavat näytteet. Myös huonolaatuisen murskeen testeissä käytetty näytekorkeus Teksasissa oli suurempi (ks. liite 2).

Suomen ja Minnesotan tulosten korrelaatio on hyvä (korrelaatiokerroin 0.9568), vaikkakin Minnesotan mittaustulosten absoluuttiset arvot olivat hieman Suomen tuloksia alhaisemmat. Teksasin tulosten korrelaatio muiden kahden laboratorion tulosten kanssa ei ollut yhtä hyvä (Fin/Tx: 0.6254, Mn/Tx:0.7057). Korrelaatiokerrointa heikensivät Teksasin omien näytteiden poikkeavat testitulokset.

Taulukko 2. Dielektrisyysarvon asymptoottiarvot TS-testeissä

Näyte	Dielektrisyysarvo		
	Suomi	Minnesota	Texas
Texas, ongelmallinen	37	26	27
Texas, hyvälaatuinen	20	15,5	
Minnesota, Class 3 (ongelm.)	20	13,7	19,2
Minnesota, Class 6 (hyväl.)	8,5	3,8	5,4
Suomi, ongelm. (Lampeltn.)	16,5	14,9	30,5
Suomi, hyvälaatuinen (Tohmov.)	8,4	4,8	10,4
Saskatchewan, ongelmallinen	17	13,3	11
Saskatchewan, hyvälaatuinen	10	10,5	10,1



Kuva 15. TS-testin asymptoottisen dielektrisyysarvon korrelaatio Suomessa, Minnesotassa ja Teksasissa suoritettujen testien välillä

3.4. NÄYTTEIDEN VESIPITOISUUS

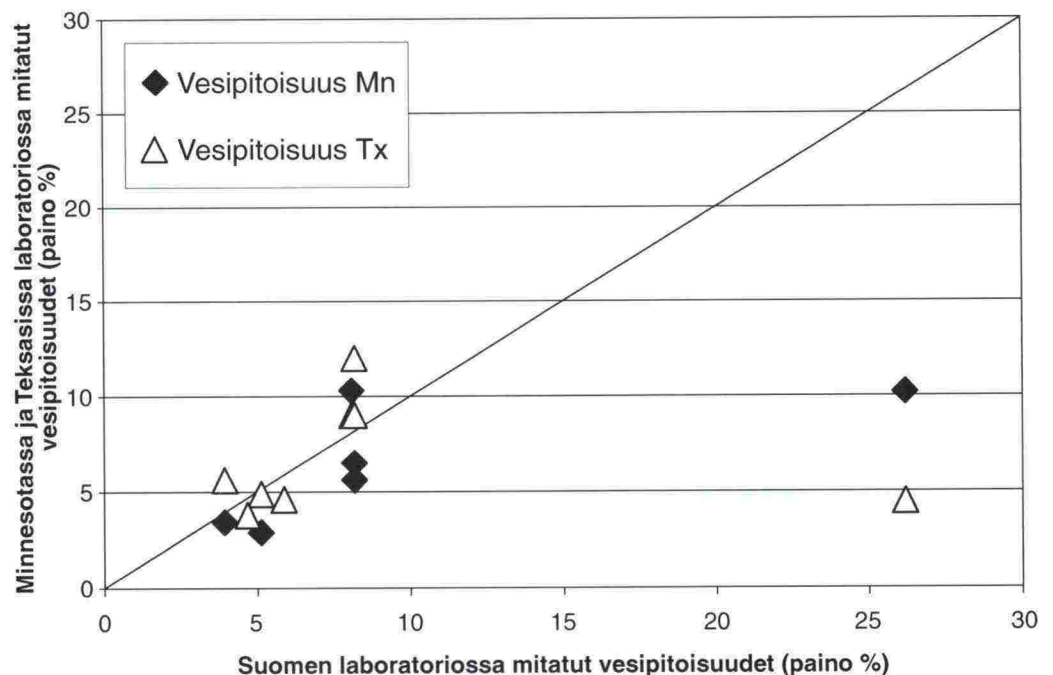
Näytteistä TS-testin jälkeen mitatut vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 3. Kuvassa 16 vertaillaan näytteillä Suomessa mitattuja vesipitoisuuksia Minnesotan ja Teksasin vastaaviin tuloksiin.

Taulukko 3. Murskenäytteiden vesipitoisuus TS-testin jälkeen.

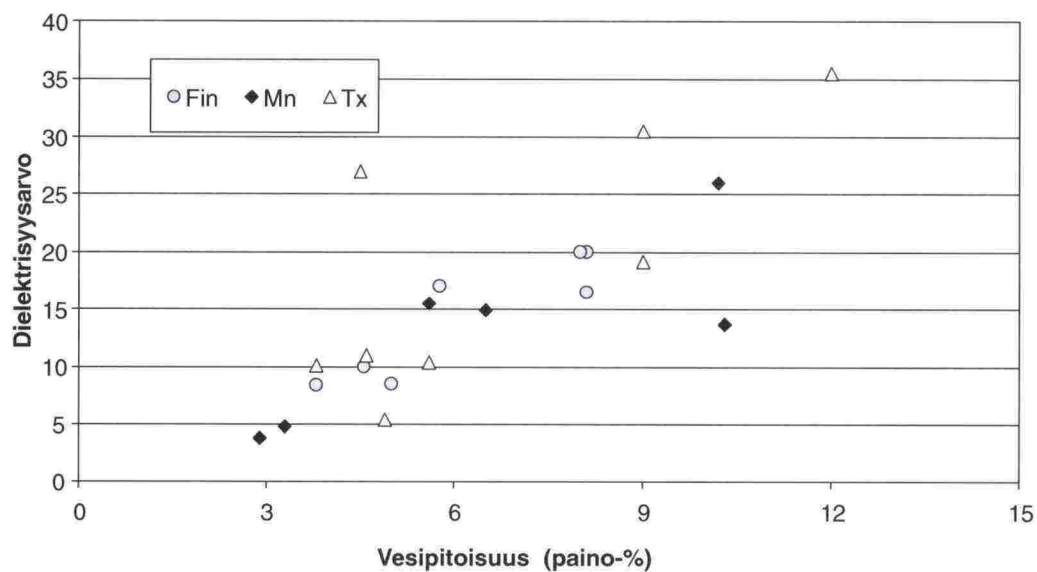
Näyte	Vesipitoisuus (paino-%)		
	Suomi	Minnesota	Teksas
Teksas, ongelmallinen	26,3 ?	10,2	4,5 (?)
Teksas, hyvälaatuinen	8,1	5,6	12,0
Minnesota, Class 3 (ongelm.)	8,0	10,3	9,0
Minnesota, Class 6 (hyväl.)	5,0	2,9	4,9
Suomi, ongelm. (Lampeltn.)	8,1	6,5	9,0
Suomi, hyvälaatuinen (Tohmov.)	3,8	3,3	5,6
Saskatchewan, ongelmallinen	5,8		4,6
Saskatchewan, hyvälaatuinen	4,6		3,8

Teksasin murskeille eri laboratorioissa mitatut vesipitoisuudet vaihtelivat erityisen paljon. Teksasin huonolaatuisen murskeen vesipitoisuus TS-testin jälkeen oli 26.3% Suomessa, 10.2% Teksasissa, ja 4.5% Minnesotassa. Suomen tulos on selkeästi liian korkea ja Teksasissa oli mitattu vain vesipitoisuuden kasvu tässä näytteessä (liite 2). Toisaalta Teksasissa suoritettujen TS-testien tulokset osoittavat, että Teksasin näytteistä hyvälaatuisen murskeen vesipitoisuus testin päättyessä oli korkeampi kuin huonolaatuiseksi luokitellun murskeen, mikä tukee Minnesotan ja Suomen testituloksia. Kuvasta 16 näkyy, että jos Teksasin huonolaatuinen murske jätetään tarkastelusta pois, Suomen ja Teksasin vesipitoisuusmittaukset korreloivat verrattain hyvin keskenään ja Minnesotassa mitatut vesipitoisuudet ovat näitä hieman alemmalla tasolla kaikissa testeissä.

Kuva 17 esittää yksittäisten testitulosten korrelaation (dielektrisyysarvo, vesipitoisuus) Suomen, Minnesotan ja Teksasin laboratorioiden välillä. Kuva osoittaa, että Suomen ja Minnesotan vesipitoisuus ja dielektrisyysarvo korreloivat hyvin keskenään, mutta Teksasin tulosten hajonta on paljon suurempi. Tulokset osoittavat myös, että Suomen mittaustulosten hajontaskaala on pienempi kuin Teksasin ja Minnesotan testitulosten. Todettakoon, että Teksasin huonolaatuisen murskeen testitulokset on jätetty pois tästä vertailusta.



Kuva 16. TS-testin jälkeen mitattujen vesipitoisuuksien korrelaatio Suomen sekä Teksasin ja Minnesotan vesipitoisuuksien kanssa.



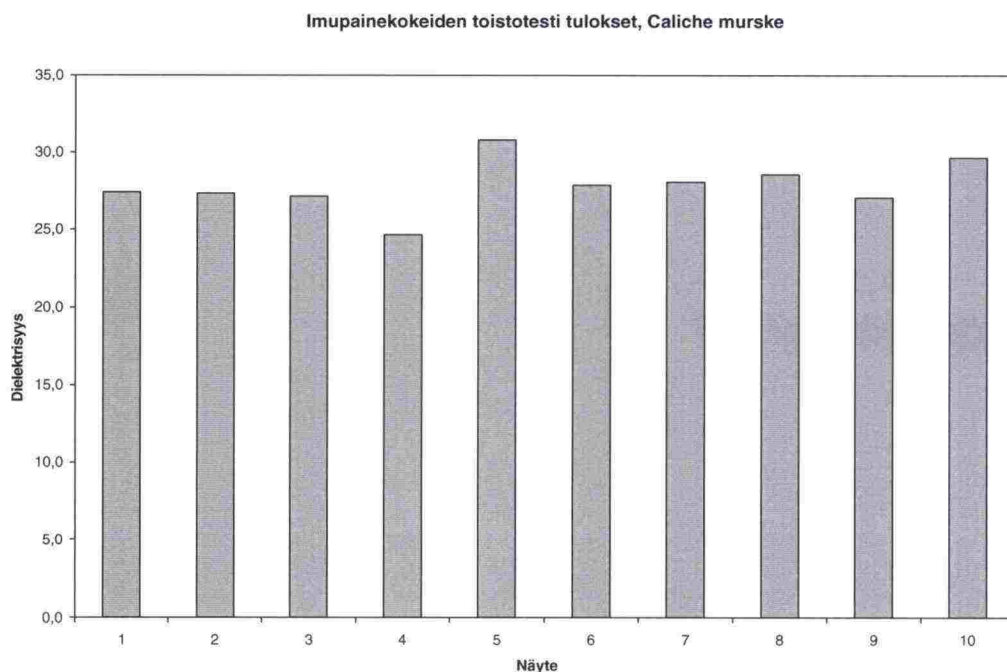
Kuva 17. Kussakin laboratoriossa tehtyjen yksittäisten TS-testien asymptoottisen dielektrisyysarvon sekä samasta näytteestä testin jälkeen mitatun vesipitoisuuden korrelaatio.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

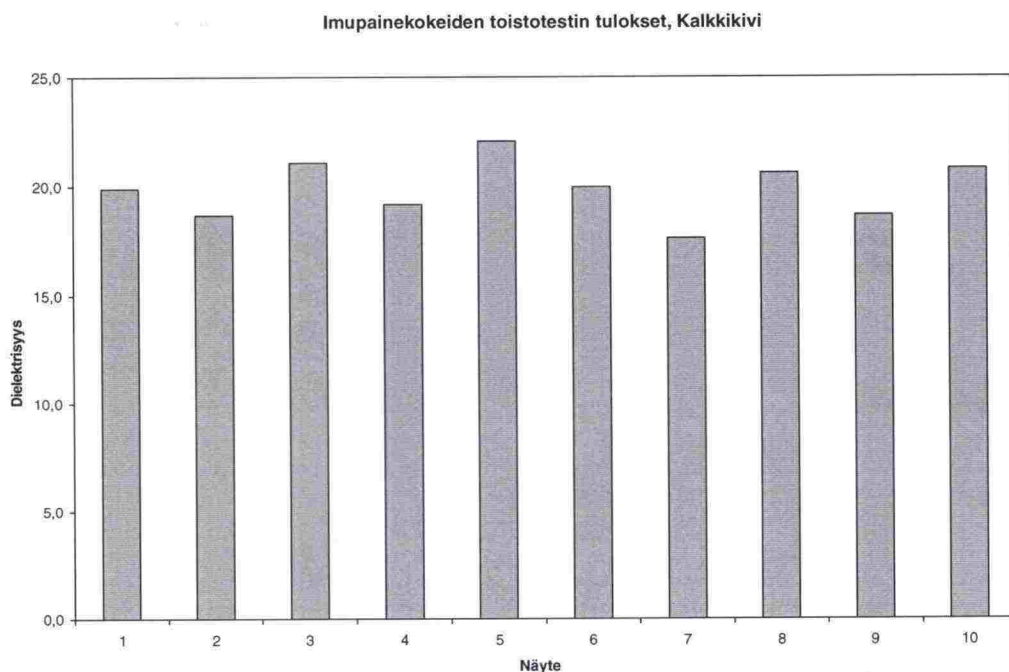
Rengastestin tulokset osoittivat, että vaikka erilaisista näytteen valmistusmenetelmistä johtuen kaikkien tutkittujen näytteiden testitulosten välillä ei ollut selvää korrelaatiota, testituloksia voitiin hyvin käyttää testin alkuperäiseen tarkoitukseen eli kantavan kerroksen murskeiden luokitteluun hyvälaatuisiin, kyseenalaisiin ja sopimattomiin murskeisiin. Kaikissa laboratorioissa tehdyt TS-testit osoittivat hyvät kantavan kerroksen materiaalit hyvälaatuisiksi ja huonot kantavan kerroksen materiaalit huonolaatuisiksi. Tutkimuksen tuloksista voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

- Suomessa käytetty näytteentiivistysmenetelmä tiivistää materiaalia hieman liikaa. Kiertotiivistintä tulisi säätää niin että tiivistystulos on lähempänä sovelletulla Proctor -tiivistysmenetelmällä saavutettua.
- Suomessa TS-testin imeytysaika 14 päivää, mutta ainakaan tämän tutkimuksen näytteissä ei tapahtunut muutoksia enää kymmenen päivän jälkeen. Testin suoritusajan lyhentäminen saattaisi olla aiheellista; tällöin testin tulokset saataisiin nopeammin ja kustannukset alenisivat.
- Minnesotassa suoritetuissa TS-testeissä dielektrisyysarvot nousivat hitaammin ja jäivät yleisesti alemmalle tasolle verrattuna muiden laboratorioiden tuloksiin. Työryhmä keskusteli ilmiön syistä useaan otteeseen, mutta ei löytänyt asialle selkeää selitystä. Yksi mahdollinen selitys on, että näyteputken pohjassa olleet reiät tukkeutuivat näytteen tiivistyksen aikana ja läpäisivät tämän vuoksi hyvin heikosti vettä. Teksasissa tehdyissä pienemmän mittakaavan tutkimuksissa (Spencer Guthrie, suullinen tiedonanto) on todettu, että asymptoottinen dielektrisyysarvo saavutetaan kolme päivää aikaisemmin, jos näyteputkeen tehdyt reiät ovat suuremmat. Minnesotan testeissä käytetty Percometer-mittauslaitteen asetus „pehmeä materiaali” selittää myös osaltaan muita alhaisempia mittausarvoja mutta ei dielektrisyysarvon hitaampaa nousua.
- Tilastollinen vertailu osoitti, että jotkin Teksasissa mitatut dielektrisyysarvot ovat liian korkeita. Tämä johtuu todennäköisimmin liian suuresta määrästä hienoaainesta, jolla on tasoitettu näytteiden pintaa. Suomessa v.1999 suoritettut testit ovat myös osoittaneet, että < 2mm materiaalin käyttäminen näytteen pinnan tasoitamiseksi vääristää mittaustuloksia, joten tämä käytäntö tulisi lopettaa. Toinen mahdollinen syy Teksasin TST-tulosten hieman korkeisiin arvoihin voi johtua näytteiden tiivistämisessä käytetyn vesijohtoveden liian suuresta suolamäärästä, mikä on saattanut johtaa osmoottisen imupaineen kasvamiseen näytemateriaalissa ja siten suurempaan kokonaisimupaineeseen näytteessä.
- Työryhmän keskusteluissa ilmeni, että testin aikana tulee jatkossa varmistaa näytteiden tasainen deionisoidun tai tislattun veden saanti ja huolehtia siitä, ettei vesiastia jossa näytteet ovat, pääse kuivumaan.

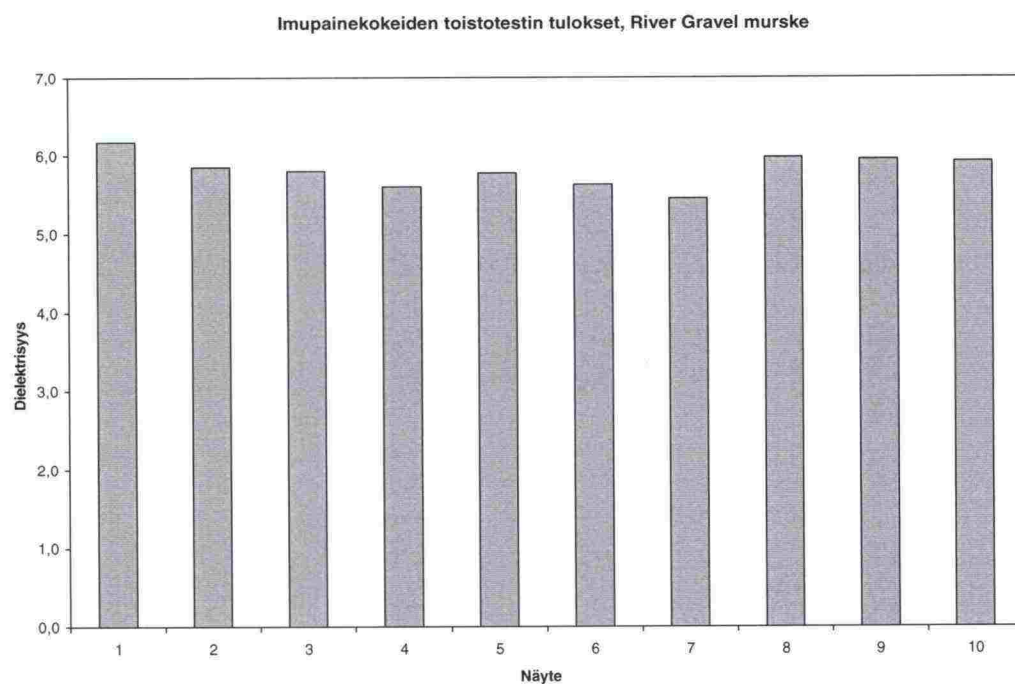
Edellä esitetyistä syistä johtuen rengastestin TS-tulokset eivät olleet kaikin osin yhteneviä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita ettei TS-testi olisi toistettavissa. Spencer Guthrie (Guthrie et al 2000) on suorittanut v. 1999 joukon TS-testin toistettavuuskokeita kolmella murskelajilla, ja näiden kokeiden tulokset (kuvat 18, 19 ja 20) osoittavat, että jos näytteet valmistetaan johdonmukaisella tavalla, TST-tulokset ovat hyvin samankaltaiset ja yhtenevät.



Kuva 18. TTI:ssä suoritettujen TS-testin toistettavuuskokeiden tulokset Caliche -murskeella (Guthrie et al. 2000)



Kuva 19. TTI:ssä suoritettujen TS-testin toistettavuuskokeiden tulokset kalkkikivimurskeella (Guthrie et al. 2000)



Kuva 20. TTI:ssä suoritettujen TS-testin toistettavuuskokeiden tulokset River gravel murskeella (jokisoramurske) (Guthrie et al. 2000)

5. SUOSITUKSIA

Seuraavassa on esitetty suositukset muutoksista TS-testin ohjeisiin:

1. Näytteet tulisi tiivistää menetelmällä, jolla päästään mahdollisimman lähelle Proctor -optimitiiviyttä. Lisämateriaalia tulee käyttää näytteen pinnalla vain pakottavissa tapauksissa, kun epätasainen pinta tekee mittaukset pintasondilla mahdottomaksi. Näissä tapauksissa materiaalin raekoon tulisi olla < 4 mm. Jos laboratorion vesijohtovesi on hyvin kloridipitoista ja veden sähkönjohtavuudeksi mitataan Percometerillä yli $200 \mu\text{S}/\text{cm}$, sitä ei pidä käyttää näytteen tiivistyksessä.
2. Tiivistämisen jälkeen näyteputkeen tehdyt reiät tulisi puhdistaa ohutta neulaa tai rautalankaa käyttäen, jotta varmistetaan näytteen riittävän hyvä kontakti veteen. Reikien suositeltava koko on 2 mm.
3. Testin aikana näyteputken pitäisi olla peitettynä kumilevyllä tai vastaavalla materiaalilla, jotta huoneen lämpötilassa ja ilmanpaineessa tapahtuvat muutokset eivät vaikuttaisi testiin, ja jotta näyte on suojattu vesiroiskeilta.
4. Mittausjakson tulisi olla 10 päivää. Tämän ajan ylittäminen on perusteltua vain jos näytteen dielektrisyysarvo viimeisten kolmen päivän aikana edelleen selvästi kasvaa.
5. Näytettä ei tarvitse punnita jokaisen mittauskerran jälkeen, mutta näytteen paino tulee punnita testin alussa ja lopussa. Testin jälkeen on suositeltavaa mitata erikseen vesipitoisuus näytteen yläosasta 50 mm paksuudelta samoin kuin koko näytteen vesipitoisuus.
6. Dielektrisyysarvon lisäksi myös näytteen sähkönjohtokyky tulisi mitata ja analysoida, jotta osmoottisen imupaineen vaikutusta kokonaisimupaineeseen näytteessä voidaan arvioida.
7. Kun näytteen pinnalta mitataan dielektrisyysarvo Percometer-pintasondilla, on aina käytettävä mittarin "kova materiaali" asetusta sekä monipistemittausta. Mittausta suoritettaessa sondi painetaan tiukasti näytettä vasten. Kontaktipainon tulisi olla n. 2,5 kg, minkä voi tarkistaa vaa'an avulla.
8. Jos TST-tulos on hyvin lähellä murskeen hylkäämiseen johtavaa luokittelua, testi voidaan uusida. Jos uusi tulos myös ylittää kriittisen rajan, tulos voidaan katsoa lopulliseksi.

LÄHDELUETTELO

Guthrie, S., Ellis, P. and Scullion, T., 2000. Repeatability and Reliability of the Tube Suction Test. TTI work report (Painossa).

Saarenketo, T. 1995. Using Electrical methods to Classify the Strength Properties of Texas and Finnish Base Course Aggregates. Center for Aggregates Research, 3rd Annual Symposium Proceedings, Austin Texas, 19 p.

Saarenketo, T. and Scullion, T. 1995. Using electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates. Research Report 1341-2. Texas Transportation Institute, College Station, Texas.

Saarenketo, T. and Scullion, T. 1996. Laboratory and GPR tests to evaluate electrical and mechanical properties of Texas and Finnish base course aggregates. Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, Sendai, Japan. p. 477-482.

Saarenketo, T., Kolisoja, P. and Scullion, T. 1998. Moisture susceptibility and electrical properties of base course aggregates. Proceeding of BCRA '98, July 6-8, Trondheim, Norway, Volume 3, p.1401 - 1410.

Scullion, T. and Saarenketo, 1997. Using Suction and Dielectric Measurements as Performance Indicators for Aggregate Base Materials. Transportation Research Board Record 1577, p. 37-44.

Yliheikkilä, T. 1998. Kemiallisen koostumuksen vaikutus murskeiden vedenherkkyyteen. Pro Gradu tutkielma, Oulun Yliopisto, Kemian laitos. 108 s.

Ylitapio, S. 1997. TS-testin käyttö sitomattomien ja bitumilla sidottujen murskeiden laadun arvioinnissa. Insinööritutkielma, Rovaniemen teknillinen oppilaitos, 35 s.

LIITE 1. YLITAPIO

IMUPAINEKOKEEN SUORITUS SUOMESSA

1. Sitomattomien putkinäytteiden valmistelu ja mittausohjeet

1.1. Näytteet

- näytettä tarvitaan imupainekokeeseen ja siihen liittyviin, määrittystä tukeviin tutkimuksiin (rakeisuus, kosteus,jne.) yhteensä vähintään 20 kg
- näytteen maksimiraekoko 18 mm
- yhtä putkinäytettä varten tarvittavan näytteen paino kuivana noin 8-9 kg

1.2. Näytteen tiivistys

- näyte tiivistetään IC-testerin avulla muovilieriöön (240 x 152 mm)
- näyte tiivistetään optimivesipitoisuudessa, joka selvitetään joko tilastollisesti tai kokeellisesti
- tutkittava materiaali esitiivistetään muovilieriöön kerroksittain siten, että tiivistettävien kerroksien rajalle ei synny liian tiivistä rajapintaa
- tiivistetyn näytteen korkeuden tulee olla 180-200 mm, joka saavutetaan eri materiaaleilla erilaisilla näytteen painoilla ja korkeuksilla
- IC-testeri on kalibroitava seuraaville asetuksille:
 - mittaripaine 6.0 bar
 - poikkeutuskulma 40 mrad
 - kierrosten lukumäärä 100
 - kierrosnopeus 32 kierrosta/min
 - lisäksi koneeseen annetaan näytteen märkäpaino
- tiivistyksen jälkeen tulostetaan IC-testerin lomake

1.3. Putkinäytteen käsittely tiivistyksen jälkeen

- tiivistyksen jälkeen putkinäytteen pohjaan laitetaan reiällinen kansi, numeroidaan näyte ja laitetaan uuniin kuivaamaan 45°C:een
- näytteen pinnan jäädessä karkeaksi ja epätasaiseksi, se voidaan tasoittaa käyttämällä saman materiaalin hienoaainesta
- putkinäytteen kuivatusta seurataan 3 päivän jälkeen niin kauan, kunnes sen paino ei enää putoa merkittävästi. Tulokset kirjataan TS-kokeen uunikuivatus lomakkeelle
- viimeisen punnituksen jälkeen näytteen annetaan tasaantua huoneenlämmössä vähintään 2 vrk ennen varsinaisen imupainekokeen aloittamista
- TS-lomakkeeseen merkitään tarvittavat päivämäärät, painot, jne.

1.4. Imupainekokeen suorittaminen

- TS-kokeen mittauslomakkeen esitäyttämisen jälkeen suoritetaan ensimmäinen dielektrisyyden ja sähkönjohtavuuden mittaus Percometerillä monipistemittauksena ennen veteen laittamista
- vesialtaaseen laitetaan tarvittava määrä (1-2 cm) tislattua vettä ja huolehditaan siitä, että vesipinta ei laske alle sallitun
- ensimmäisenä mittauspäivänä mittaukset suoritetaan kahden tunnin välein (klo. 8.00, 10.00, 12.00, 14.00, 16.00), lisäksi suoritetaan yksi mittaus noin puolen tunnin kuluttua näytteen veteen laittamisesta
- toisesta mittauspäivästä lähtien mittauksia tehdään vain aamuisin (kerran vuorokaudessa)
- mittauksia jatketaan niin kauan, kunnes näytteen paino ei enää nouse kolmena peräkkäisenä mittauspäivänä
- jokaisen mittauksen yhteydessä mitataan:
 - dielektrisyys (keskiarvo)
 - sähkönjohtavuus (keskiarvo)
 - putkinäytteen paino ja korkeus
 - veden korkeus
- imupainekokeen jälkeen voidaan haluttaessa määrittää näytteestä rakeisuus, pintavesipitoisuus (5cm), kokonaisvesipitoisuus, kiintotiheys
- imupainekokeen tuloksista lasketaan parametrit tietokoneen avulla (asymptootit ja kulmakertoimet)

2. Putkinäytteen tiivistäminen IC-testerillä optimivesipitoisuudessa

Optimivesipitoisuus määritetään joko

- a) tilastollisesti tai
- b) kokeellisesti

Optimivesipitoisuuden määrittämiseksi on kehitelty taulukoita, joista voidaan suoraan lukea materiaalin optimivesipitoisuus. Nämä taulukot ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, koska näytteen optimivesipitoisuuden arvoon vaikuttaa mm. rakeisuus ja erityisesti hienoaineksen määrä.

Kokeellisesti optimivesipitoisuus määritellään Proctor-sullonnan avulla, mutta tämä lisää tutkimuksen hintaa.

Tarkoituksenmukaisinta on optimipitoisuuden tilastollinen ja kokemusperäinen arvioiminen. Tällöin, jos näyte sisältää runsaasti hienoainesta tulee optimivesipitoisuuden olla normaalia suurempi.

Maalajien tyypillisiä optimivesipitoisuuksia

Maalajit	Proctor-tiiviys [kN/m ³]	Optimivesi- pitoisuus [%]
Sora	20-22	5-7
Hiekka	16-20	10-18
Siltti	15-18	15-25
Savi	14-17	20-30
Moreenit	18-22	6-12

3. Putkinäytteen korkeuden säätö

Tiivistetyn näytteen korkeuden tulee olla välillä 180-200 mm, jotta eri näytteiden vertailukelpoisuus säilyisi.

Jotta oikea näytekorkeus saavutetaan, on tunnettava eri materiaalien tiivistymisominaisuudet. Yleisesti ottaen voidaan todeta karkeiden materiaalien tiivistyvän vähemmän esitiivistyksen jälkeen kuin hienoainesrikkaat materiaalit.

Aikaisemmat IC-testerin tulokset ovat osoittaneet, että keskimääräinen tiivistymispainuma murskenäytteillä on noin 10-20 mm.

Kun putken korkeus on noin 230 mm, voi esitiivistetyn näytteen korkeus voi olla noin 20 mm alle putken korkeuden, tiivistymispainuma on huomioitu.

LIITE 2. GUTHRIE JA SCULLION

Teksasin Tube Suction rengastestien tulokset

Kirjoittajat:

Spencer Guthrie, E.I.T.
Texas Transportation Institute
Texas A&M University
College Station, TX 77843-3135
(409) 845-9919
Fax (409) 845-0278
s-guthrie@ttimail.tamu.edu

Tom Scullion, P.E.
Texas Transportation Institute
Texas A&M University
College Station, TX 77843-3135
(409) 845-9913
Fax (409) 845-0278
t-scullion@ttimail.tamu.edu

Helmikuu 2000

JOHDANTO

Tässä raportissa kuvataan yksityiskohtaisesti Texas Transportation Institutessa (TTI) suoritettujen Tube Suction -testien (TS-testien) menetelmät rengastesteissä, jotka suoritettiin yhteistyönä TTI:n, Suomen Tielaitoksen, Minnesota Department of Transportation:in ja Saskatchewan Highways and Transportation:in kanssa. Kukin projektiin osallistunut laitos lähetti muille yhteistyölaboratorioille tutkittavaksi näytteen alueellaan käytetystä hyvälaatuisesta ja heikkolaatuisesta kantavan kerroksen murskeesta. Saskatchewan Highways and Transportation -laboratoriota lukuunottamatta jokainen laboratorio suoritti TS-testit kaikille näytteille.

Tässä raportissa selostetaan TST-näytteiden valmistamisen, tiivistämisen, testin suorittamisen sekä dielektrisyysmittausten suorittamisen menetelmät TTI:ssä, samoin kuin TTI:n rengastestien erityiset tulokset. Kunkin näytteen testituloksista on myös valmistettu omat raporttinsa; nämä raportit esittävät myös kunkin yksittäisen näytteen valmistusta ja testin kulkua koskevia huomioita.

NÄYTTEEN ESIVALMISTELUT

Murskenäytteen esivalmistelut testiä varten tehtiin normaalisti seuraavasti. Jokainen näyte tarkistettiin silmämääräisesti näytteen vastaanoton jälkeen. Hyvin karkeita materiaaleja sisältävät näytteet seulottiin 1,5 tuuman seulalla ja kaikki seulaan jäänyt materiaali jätettiin testinäytteestä pois. Näytemateriaalin rajallisen määrän vuoksi testejä optimikosteuden määrittämiseksi ei tehty Suomen, Minnesotan, tai Saskatchewanin näytteille. Koska Minnesotan näytteet ilmeisesti olivat saapuessaan lähellä optimikosteustilaa, ne tiivistettiin siinä kosteudessa kuin ne olivat saapuessaan. Muihin näytteisiin lisättiin vettä vähitellen ja materiaalia välillä sekoittaen kunnes päästiin haluttuun kosteuteen ennen näytteen tiivistämistä. Näin tehtynä saatiin Suomen Lampeltmossen-näytteelle arvioitua optimikosteudeksi 5,3 %, Tohmovaaran näytteelle 3,0 %, Saskatchewanin hyvälaatuiselle murskeelle 5,9% ja Saskatchewanin huonolaatuiselle murskeelle 6,0 %.

TIIVISTYSMENETELMÄ

Valmistelujen jälkeen murskenäytteet tiivistettiin halkaisijaltaan 6 tuuman (15 cm) ja korkeudeltaan 12 tuuman (30 cm) muovisylintereihin. Kaikki näytteet tiivistettiin käyttäen 10 paunan (4,25 kg) pudotuvasaraa ja 18 tuuman (45 cm) pudotuskorkeutta. Näytettä tiivistettiin neljässä osassa, siten että jokaisen tiivistyskerran jälkeen materiaalia lisättiin n. 5 cm (2 tuumaa). Näytteiden lopullinen korkeus oli noin 20 cm (8 tuumaa).

Lukuunottamatta Saskatschewanin murskenäytteitä ja Teksasin heikkolaatuista murskenäytettä, näytteitä tiivistettiin kaikilla neljällä tiivistyskerralla 30 pudotuksella. Saskatchewanin näytteille pudotusten määrä nostettiin 50:een, samalla kun metallikaulusta käytettiin muovisylinterin vahvistuksena. Teksasin heikkolaatuinen murskenäyte tiivistettiin myös käyttäen 50 pudotusta kullakin tiivistyskerralla, mutta 12 tuuman tavoitekorkeuteen. Näytteiden pinnan

tasaamiseksi kaikkien muiden, paitsi Saskatchewanin, näytteiden pinnalle lisättiin hieman hienoaainesta, ja näytteiden pinnat tasoitettiin painelemalla halkaisijaltaan 4 tuuman (10 cm) metallilevyä näytteen pintaan.

NÄYTTEEN KUIVAUS

Tiivistyksen jälkeen jokainen näyte kuivattiin tietokoneen valvomissa olosuhteissa kuivauskaapissa 75 % suhteellisessa kosteudessa ja 104 ° F (n. 40°C) lämpötilassa. Näytteet jätettiin kaappiin kunnes niiden paino vakiintui, mikä kesti usein jopa 20 päivää. Lyhyimmillään näyte saavutti vakiopainon 13 päivässä.

MUOTIN VALMISTUS

Ennen kuin näyte asetettiin vesiastiaan, muovisylinterin ympäri porattiin 39 kappaletta 1/16 tuuman (1,6 mm) reikää kehään noin 1/4 tuuman (6 mm) korkeudelle sylinterin alareunasta. Reikien väliksi tuli noin 1/2 tuumaa (12,5 mm). Lisäksi porattiin neljä, samoin 1/16 tuuman reikää sylinterin pohjaan, tasaisin välimatkoin kuvitteellisen 4 tuuman (10 cm) halkaisijaltaan olevan keskitetyn ympyrän kehälle. Saskatchewanin näytettä lukuunottamatta kaikki sylinterit rei'itettiin tiivistyksen jälkeen, näyttemateriaalin ollessa niiden sisällä. Saskatchewanin näytteiden testiastioihin reiät porattiin etukäteen.

NÄYTTEEN TESTAUS

Sylinterin rei'ittämisen jälkeen näytteet asetettiin 7,5 cm korkeaan vesiastiaan. Testi tapahtui huonelämpötilassa. Astiaan mahtui enimmillään kymmenen näytettä niin, että näyteryhmän keskelle jäi tarpeeksi tilaa näytteiden siirtelyä ja dielektrisyysmittausten sekä punnitusten suorittamista varten. Koska yhtäkään näytettä ei koskaan nostettu ylemmäksi kuin 4 tuumaa (10 cm) astian pohjasta, veden roiskuminen toisten näytteiden pinnalle oli täysin estetty. Sylintereiden päällä ei käytetty kansia. Testausastiassa oli 1/2 tuuman (12,5 mm) verran tislattua vettä. Veden taso kontrolloitiin päivittäin, ja vettä lisättiin tarvittaessa.

MITTAUSTIETOJEN KERUU

Dielektrisyysmittaukset suoritettiin Adek Percometerin analogisella versiolla, joka oli varustettu 1-7/8 tuumaa (4,7 cm) halkaisijaltaan olevalla sensorilla. Mittauksissa käytettiin aina "kovan materiaalin" mittausvalintaa. Jokainen mittaus suoritettiin painamalla sensoria näytteen pintaa vasten keskimäärin 11-15 naulan (4,7 - 6,4 kg) voimalla. Jos näytteen pinta oli epätasainen, voitiin sensoria kiertää paikallaan muutaman kerran paremman kontaktin saamiseksi ennen mittausta.

Näytteen pinnalta otettiin viisi dielektrisyysmittausta tasaisin välimatkoin kehällä ja tämän lisäksi yksi mittaus kehän keskeltä. Näytteen punnitustulokset tallennettiin myös aikavälein, jotka ilmenevät mittaustulosraporteista. Kuudesta mitatusta dielektrisyysarvosta pudotettiin pois suurin ja pienin arvo, ja neljän jäljelle jääneen arvon keskiarvo laskettiin mittauksilokseksi, jonka kehittymistä

seurattiin ajan funktiona. Näytteitä pidettiin testialtaassa ja niitä mitattiin noin 10 päivän ajan, lukuunottamatta Teksasin hyvänlaatuisen materiaalin näytettä, joka poistettiin testialtaasta aikaisemmin, kun dielektrisyysarvo oli ylittänyt 30. Niiden näytteiden, jotka eivät ilmeisesti olleet saavuttaneet vakiintunutta dielektrisyystasoa, mittauksia jatkettiin muutamia lisäpäiviä dielektrisyysarvon kehityksen todentamiseksi paremmin.

Imeytyksen päätyttyä kaikki näytteet paitsi Teksasin heikkolaatuisen murskeen näyte asetettiin, edelleen testimuoteissaan, uuniin 200 ° F (95°C) lämpötilaan näytteiden kosteuden määrittämiseksi ja samalla näytteille tehtiin rakeisuus-analyysi. Sähkönjohtavuutta ei mitattu muista näytteistä kuin Teksasin heikkolaatuisesta murskeesta, jonka sähkönjohtavuusarvo oli korkeimmillaan 250µs/cm.

TESTIN TULOKSET

Taulukossa 1 on esitetty keskeiset mittaustulokset. Taulukossa esitetyt Suomen ja Minnesotan näytteiden sekä Teksasin heikkolaatuisen murskeen dielektrisyysarvot ja kosteuspitoisuudet mitattiin, kun näytteet olivat seisonheet testiastiassa 220 tuntia. Saskatchewanin murskenäytteen dielektrisyysarvo ja kosteuspitoisuus mitattiin 259 tunnin testin jälkeen. Teksasin hyvälaatuisen murskenäytteen testi lopetettiin 148 tunnin jälkeen.

Taulukko 1. Teksasin testitulokset

Murskenäyte	Kuivairtitiheys (lb/ft ³)	Vesipitoisuus (paino- %)	Dielektrisyysarvo
Fin, Tohmovaara	127,1	5,6	10,4
Fin, Lampeltmossen	123,5	9,0	30,5
Mn, Class 6	108,7	4,9	5,4
Mn, Class 3	116,7	9,0	19,2
Sask, Hyväl.	139,1	3,8	10,1
Sask, Heikkol.	141,6	4,6	11,0
Tx, Hyväl.	123,1	12,0	35,5
Tx, Heikkol.		4,5	27,0

Teksasin heikkolaatuisen murskeen vesipitoisuustulos ei ole absoluuttinen vesipitoisuus, vaan se heijastaa testin aikana materiaaliin imeytyneen veden määrää. Kaikkien muiden näytteiden vesipitoisuudet ovat mitattuja absoluuttisia vesipitoisuuksia.

HAVAINTOJA / JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Seuraavassa on kirjattu testien aikana tehtyjä havaintoja, jotka voivat palvella TS-testin jatkokehittelyä. Nämä havainnot rajoittuvat käsittelemään tiivistysmenetelmää, näytteen kuivausta, testausmuotin valmistamista, sekä mittauksen suorittamista.

TIIVISTÄMINEN

Kun hienoainesta lisättiin näytteen pinnalle, ainoa murske joka tuotti epätavallisia tuloksia varsinaisessa testissä oli Teksasin hyvälaatuinen murske. Tämän näytteen pinnalla oli lähes tuuman kerros hienoainesta, joka pehmeni testin aikana niin paljon että mittaussensori jätti siihen syvän kolon, kun muiden näytteiden pinnalle ei sensorista jäänyt mitään jälkeä. Dielektrisyysmittarin pintasondi mittaa todennetusti noin yhden tuuman mittaussyvyydelle, ja materiaalin rakeisuus ja kosteus tällä alueella säätelevät suoraan mittaustulosta. Myöhemmissä TTI:ssä suoritetuissa testeissä hienoaineksen käyttö näytteen pinnan tasaamiseen on lopetettu kokonaan, jotta näytteen materiaali olisi mahdollisimman homogeenista ja edustavaa.

NÄYTTEEN KUIVAUS

Rengastestien jokainen näyte kuivattiin 104 ° F (40°C) lämpötilassa ja 75 % suhteellisessa kosteudessa kunnes näytteiden paino pysyi vakaana. Tämä kuivatusprosessi vei usein jopa kolme viikkoa. Lisätutkimuksissa on todettu, että kuivausolosuhteissa vakiopainon saavuttamisenkin jälkeen näytteeseen saattaa kuitenkin jäädä jopa 4 % vettä. Vaikka tasapainotilan saavuttamiseen vaaditaan kolme viikkoa, TTI:ssä on todettu kolmen päivän kuivatusajan olevan riittävän onnistuneen TS-testin suorittamiseen. Tämän vuoksi ehdotetaan, että lopullisissa TST-ohjeissa kuivausohjetta tarkistetaan.

NÄYTESYLINTERIN VALMISTAMINEN

TTI suosittaa, että näytesylintereihin vesikontaktin parantamiseksi porattujen reikien koon ja lukumäärän vaikutus TS-testin tuloksiin analysoidaan. Veden kanssa kontaktissa olevan alueen lisääminen saattaisi lyhentää testiin tarvittavaa aikaa.

MITTAUSTEN SUORITTAMINEN

TTI tukee Suomen Tielaitoksen esitystä, että näytteiden punnitseminen jokaisen dielektrisyysmittauksen yhteydessä ei ole tarpeellista. Näytteen punnitseminen ennen testin aloittamista sekä testin päätyttyä on kuitenkin välttämätön vesipitoisuuden kasvun laskemiseksi. TTI:ssä saadut kokemukset tukevat myös johtopäätöstä, että testin loppuvaiheessa mitatut dielektrisyysarvot ovat testin kannalta tärkeimpiä ja testin alkuvaiheessa tehtyjen mittausten lukumäärää voitaisiin pienentää korkeintaan yhteen mittaukseen päivässä.

YHTEENVETO

Tämä raportti rajoittuu vain rengastestien kokemuksiin TTI:ssä, esittäen yksityiskohtaisen kuvauksen käytetyistä menetelmistä. Informaatio on tarkoitettu vertailtavaksi muun tähän TS-testin arviointiin osallistuneista laitoksista saadun materiaalin kanssa. Kuten tämän raportin eri osien kommentteissa esitetään, lisätutkimuksia tarvitaan etenkin TS-testiin tarvittavan ajan lyhentämiskeinojen tutkimiseksi, sekä testitulosten herkkyydestä testin eri muuttujille. Lisäksi, TS-testin maailmanlaajuisen vertailtavuuden helpottamiseksi, testille tulee kehittää (ja toteuttaa) yhdenmukaiset ohjeet. Tässä vaiheessa testin toistettavuutta ja luotettavuutta tulisi myös tutkia.

ISSN 0788-3722
ISBN 951-726-636-7
TIEL 3200608